

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení - 338

Měření na vzduchové trati, stanovení součinitele místních ztrát pro
vybrané prvky

Measurement of Air Circuit, Determination of Local Hydraulic
Losses for Selected Components

Student:

Jiří Morávek

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Marian Bojko, Ph.D.

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- беру на ве́доміі, же Высoкá škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, же odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o veřejných školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby

V Ostravě

.....

podpis studenta

Jméno a příjmení:

Jiří Morávek

Adresa trvalého pobytu :

Mohelnice, Medkova 20, 78985

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Měření na vzduchové trati, stanovení součinitele místních ztrát pro vybrané prvky : bakalářská práce. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2010, 40 s. Vedoucí práce: Bojko, M.

Cílem této bakalářské práce je stanovení součinitele místních ztrát pro vybrané prvky (koleno 90°, koleno 45° a zúžení). Teoretická část bakalářské práce se zabývá rozbořem hydraulických ztrát, a zejména definováním a výpočtem třecích a místních ztrát. V praktické části bude sestavena experimentální měřicí trať, na které proběhne měření tlakové ztráty Δp_z na vybraných prvcích. Měřené fyzikální veličiny (tlak, průtok) budou následně vyhodnoceny pomocí tabulek a grafů.

ANNOTATION BACHELOR THESIS

Measurement of Air Circuit, Determination of Local Hydraulic Losses for Selected Components : Bachelor Thesis. Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipments, 2010, 40 p. Thesis head: Bojko, M.

Reason of this thesis is determined of factor local loss for chosen elements (bend 90°, bend 45° and reduction). Theoretical part of thesis deals with analysis of hydraulic losses and especially definition and solution of frictional and local losses. In practical part experimental measuring of line will be construct on which the measuring of pressure losses Δp_z will pass on the chosen elements. Measured physical properties (pressure, flow rate) will be evaluated by tables and graphs.

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Marianu Bojkovi, Ph.D. za ochotu při odborných konzultacích a realizaci měření.

Seznam použitého značení

Re	Reynoldsovo číslo	[1]
h_z	ztrátová výška	[m]
e_z	měrná ztrátová energie	[J · kg ⁻¹]
p_z	tlaková ztráta	[Pa]
Q_v	objemový průtok	[m ³ · s ⁻¹]
Q_m	hmotnostní průtok	[kg · s ⁻¹]
p, p_1, p_2	tlak	[Pa]
ρ	hustota	[kg · m ⁻³]
v_s	střední rychlost	[m · s ⁻¹]
v, v_1, v_2	rychlost	[m · s ⁻¹]
g	tíhové zrychlení	[m · s ⁻²]
d_h	hydraulický průměr	[m]
h, h_1, h_2	výška	[m]
m	hmotnost plynu	[kg]
S	průřez potrubí	[m ²]
V	objem tekutiny	[m ³]
F	síla	[N]
T	teplota	[K]
t	čas	[s]
ζ_m	součinitel místních ztrát	[1]
ν	kinematická viskozita	[m · s ⁻¹]
n	látkové množství	[mol]
R	univerzální plynová konstanta	[J · K _{mol} ⁻¹ · K ⁻¹]
r	měrná plynová konstanta	[J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]

Obsah

	strana
Seznam použitých značek a symbolů.....	6
1 Úvod.....	8
2 Definice hydraulických ztrát.....	9
2.1 Ztráty třením.....	9
2.2 Ztráty místní.....	9
2.3 Bernoulliho rovnice.....	10
3 Proudění skutečných tekutin.....	11
3.1 Reynoldsovo číslo.....	11
3.2 Laminární proudění tekutiny v potrubí kruhového průřezu.....	13
3.3 Turbulentní proudění tekutiny v potrubí kruhového průřezu.....	14
3.4 Stlačený vzduch.....	15
4 Měření průtoku tekutin.....	16
4.1 Objemový průtok.....	16
4.2 Hmotnostní průtok.....	17
4.3 Základní metody měření průtoku tekutiny.....	17
5 Měření tlaku.....	20
5.1 Rozdělení přístrojů k měření tlaku.....	21
6 Návrh experimentální měřicí trati k měření tlakových ztrát.....	22
6.1 Popis měřicího zařízení.....	22
6.2 Specifikace prvků použitých při měření na experimentální měřicí trati.....	25
6.3 Postup měření.....	27
7 Vyhodnocení naměřených hodnot pro měření na kolenu 90°.....	28
7.1 Postup výpočtu.....	28
7.2 Příklad výpočtu pro koleno 90°.....	29
7.3 Naměřené a vypočtené hodnoty pro koleno 90°.....	29
7.4 Grafické závislosti z naměřených a vypočtených hodnot pro koleno 90°.....	30
8 Závěr.....	33
9 Seznam použité literatury.....	34
10 Přílohy.....	35
10.1 Naměřené a vypočtené hodnoty.....	35
10.2 Grafické závislosti.....	36

1. Úvod

Měření místních ztrát v potrubí kruhového průřezu na vzduchové trati patří mezi základní experimentální měření a poskytuje poznatky o vlivu součinitele místních ztrát různých hydraulických prvků. Součinitel místních ztrát se mění v závislosti na typu prvku, velikosti rychlosti proudění a dalších parametrech. S ohledem na tyto poznatky je nutné odpovědně přihlídnout k volbě vhodného prvku pro daný obvod s respektováním hydraulických ztrát.

Teoretický rozbor se v první fázi věnuje oblasti definování a výpočtu třecích a místních ztrát v potrubí kruhového průřezu. Dále pak výpočtu Reynoldsova čísla, pomocí kterého se určí o jaký typ proudění se jedná (laminární, turbulentní). V druhé fázi je charakteristika, měření základních fyzikálních veličin (průtoku, tlaku), které patří do oblasti měření neelektrických veličin v hydromechanice. Mezi základní metody měření průtoku tekutin patří, měření objemového a hmotnostního průtoku.

Hlavní částí práce je návrh a sestavení experimentální měřicí trati, na které bude realizováno měření základních fyzikálních veličin (tlak, průtok). Trať se skládá z plastového potrubí kruhového průřezu, ve kterém jsou vloženy měřené prvky (koleno 90°, koleno 45° a zúžení). Tyto prvky jsou použité pro experimentální měření, při kterém se měří tlaková ztráta Δp_z prvku. Dále k měření průtočného množství vzduchu je použita clona, na které se vyhodnocuje tlaková ztráta Δp_c . Použitým médiem v potrubí je vzduch, který je přiváděn pomocí ventilátoru. Ke změně otáček ventilátoru slouží frekvenční měnič. Naměřené hodnoty jsou použity pro výpočet střední hodnoty rychlosti v_s , objemového průtoku Q_v , Reynoldsova čísla a součinitele místních ztrát ξ_m . Z těchto vypočtených hodnot sestrojím grafy závislosti tlakového spádu Δp_z na střední rychlosti v_s a objemovém průtoku Q_v . Následně vyhodnotím závislost součinitele místních ztrát ξ_m na Reynoldsově čísle a střední rychlosti v_s .

2. Definice hydraulických ztrát

Při proudění skutečných tekutin v potrubí kruhového průřezu vznikají následkem viskozity hydraulické ztráty, tzn. síly, které působí proti pohybu částic tekutiny. Pod pojmem hydraulické odpory zahrnujeme při proudění skutečné tekutiny všechny účinky, které způsobují změnu tlaku a průtoku. Hydraulické ztráty se dělí na ztráty třecí a místní. S ohledem na tyto hydraulické ztráty je nutné odpovědně přihlídnout k volbě vhodného prvku pro daný obvod.

2.1. Ztráty třením [λ]

Třecí ztráty jsou charakteristické tím, že závisí na délce potrubí. Ztrátový součinitel třecího odporu je přímo úměrný délce potrubí l . Pro měření tlakové ztráty Δp_z je nejdůležitější vybrat přímý úsek potrubí, ve kterém jsou vyloučeny jiné ztráty než třecí. Je velmi důležité, aby před prvním odběrem statického tlaku byl úsek potrubí dostatečně dlouhý, aby zde bylo možné dosáhnout ustáleného rychlostního profilu. Pro turbulentní proudění se z pravidla volí délka potrubí před prvním odběrem statického tlaku $l_1 = |50 \div 100| \cdot D$.

2.2. Ztráty místní [ξ]

Místní ztráty vznikají v místech, kde se mění velikost rychlosti i směr rychlosti a dochází přitom k odtržení proudu a vzniku vířivé oblasti. Součinitel místního odporu ζ_m závisí na tvaru vloženého prvku, rychlosti a druhu proudící tekutiny (plyn, kapalina). Měření se provádí na konkrétním prvku např. (zúžení, koleno, clona). Všechny tyto změny, ke kterým dochází změnou proudění tekutiny ve vloženém prvku, vyvolávají ztrátovou energii, kterou můžeme vyjádřit součinitelem místních ztrát ζ_m . Při velkých Re-číslích je ztrátový součinitel konstantní a stanovuje se experimentálně.

Pro výpočet místních ztrát použijeme následující vzorce, které vychází z Bernoulliho rovnice :

Ztrátová výška

$$h_z = \zeta_m \cdot \frac{v_s^2}{2 \cdot g} \quad [m] \quad (2.1)$$

Měrná ztrátová energie

$$e_z = g \cdot h_z = \zeta_m \cdot \frac{v_s^2}{2} \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (2.2)$$

Tlaková ztráta

$$p_z = e_z \cdot \rho = \zeta_m \cdot \frac{v_s^2}{2} \cdot \rho \quad [Pa] \quad (2.3)$$

Popis proměnných

ζ_m - součinitel místních ztrát [1], v_s - střední rychlost [$m \cdot s^{-1}$], g - tíhové zrychlení [$m \cdot s^{-2}$], ρ - hustota [$kg \cdot m^{-3}$].

2.3. Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice vyjadřuje zákon zachování energie a lze ji také definovat pro proudění ideální a skutečné kapaliny. Ideální kapalina je nestlačitelná a bez vnitřního tření, oproti skutečné (viskózní) kapalině. Pro skutečnou kapalinu se Bernoulliho rovnice doplňuje o ztrátovou energii. Ke ztrátám dochází díky tření o stěny nádoby díky náhlé změně směru proudící kapaliny. Z Bernoulliho rovnice plyne, že tlak proudící kapaliny klesá se zvyšující se rychlostí. Při snížení tlaku kapaliny v zúženém místě potrubí dochází k tzv. hydrodynamickému paradoxu.

Základní tvar Bernoulliho rovnice :

Pro ideální kapalinu :
$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + g \cdot h = konst \quad (2.4)$$

Pro skutečnou kapalinu :
$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g \cdot h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h_2 + e_z \quad (2.5)$$

Popis proměnných

ρ - hustota [$kg \cdot m^{-3}$], p, p_1, p_2 - tlak [Pa], g - tíhové zrychlení [$m \cdot s^{-2}$], h, h_1, h_2 - výška [m], v, v_1, v_2 - rychlost [$m \cdot s^{-1}$], e_z - měrná ztrátová energie [$J \cdot kg^{-1}$].

3. Proudění skutečných tekutin

Pohyb tekutiny nazýváme prouděním, kterým se zabývá určitá část mechaniky tekutin, tuto část můžeme rozdělit na aerodynamiku a hydrodynamiku. Proudění se vyšetřuje v prostoru, rovině nebo po křivce buď sledováním pohybu určité částice tekutiny jako hmotného bodu, nebo se sleduje celý proud v určitém časovém okamžiku. Skutečná kapalina je stlačitelná a viskózní, což znamená, že má vnitřní tření na rozdíl od ideální tekutiny, ve které ke vnitřnímu tření nedochází a je nestlačitelná. Při proudění se pak viskozita (vnitřní tření) projevuje tím, že sousední částice působí na sebe třecí silou. Proudění skutečných tekutin tzn. tekutin s vnitřním třením, můžeme rozdělit na laminární a turbulentní. Tyto dva druhy proudění se liší jak rychlostním profilem tak i velikostí hydraulických ztrát. Druhy proudění nám popisuje Reynoldsovo číslo.

3.1. Definice Reynoldsova čísla

Reynoldsovo číslo je bezrozměrné a vyjadřuje fyzikální podobnost jevů charakteristických setrvačnými a třecími silami. Pro proudění v potrubí kruhového průřezu se kritické Re uvádí nejčastěji $Re_k = 2320$. Při hodnotách Re menších než Re_k , se jedná o proudění laminární. Při překročení Re_k , jde o proudění turbulentní. Přejít laminárního proudění v turbulentní závisí i na dalších vlastnostech, např. na počátečním úseku potrubí, drsnosti stěn potrubí, geometrii proudu, tlakovém spádu, průtoku atd. Podle současných názorů jednou z příčin přechodu laminárního proudění v turbulentní je nestabilita laminárního proudění. Experimentálně bylo ověřeno, že laminárního proudění se dosáhne v potrubí i při velikosti Re čísla řádově 10^4 . Znamená to, že existuje přechodová oblast při proudění skutečné tekutiny, a to v rozmezí $2320 < Re_k < 10000$, kdy se podle konkrétních

podmínek může vyskytovat jak proudění laminární, tak i turbulentní. U laminárního proudění nedochází k makroskopickému promíchávání vrstev tekutiny.

Reynoldsovo číslo je definováno vztahem

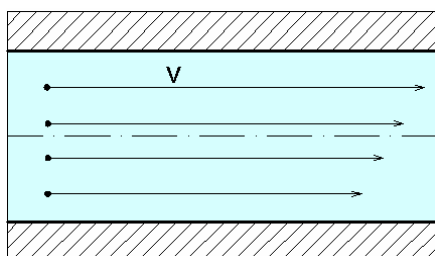
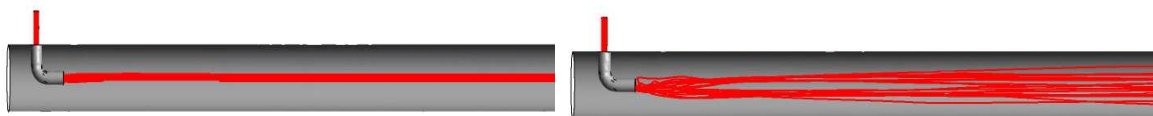
$$\text{Re} = \frac{v_s \cdot d_h}{\nu}, \quad (3.1)$$

Popis proměnných :

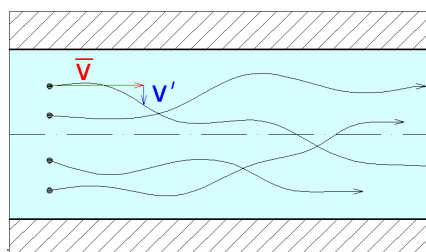
v_s - střední rychlost [$m \cdot s^{-1}$], d_h - hydraulický průměr potrubí [m],

ν - kinematická viskozita [$m \cdot s^{-1}$].

Laminární proudění (obr.3.1) se vyznačuje tím, že když při malém Re čísle do kapaliny přivedeme obarvenou tekutinu, tak se obarvená tekutina pohybuje ve vodorovném směru, ale při turbulentním proudění (obr.3.2), které vzniká při Re větších jak 2320, se pohyb kapaliny skládá ze složky vodorovné a turbulentní (flukтуаční) rychlosti.

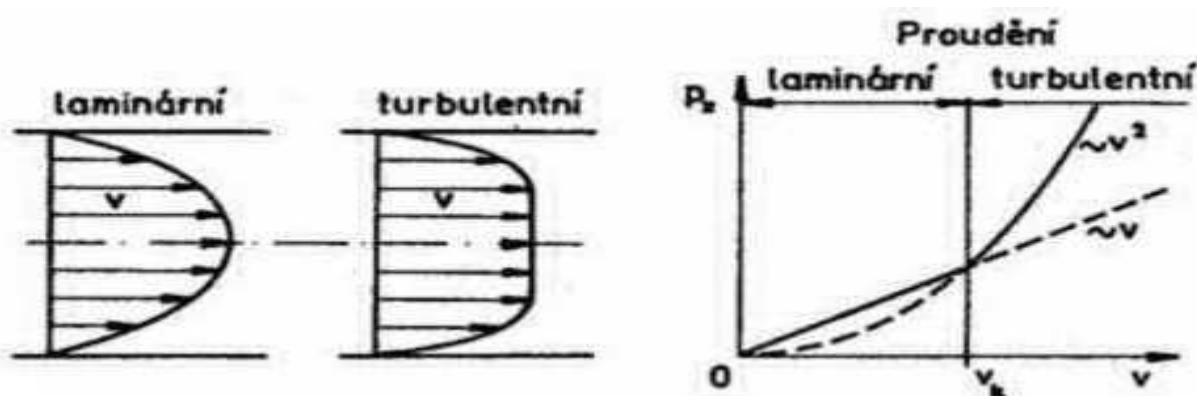


Obr.3.1 –Laminární proudění [2]



Obr.3.2-Turbulentní proudění [2]

Na (obr 3.3) je znázorněn rychlostní profil laminárního a turbulentního proudění a také závislost tlakové ztráty Δp_z na rychlosti v . Rychlostní profil u laminárního proudění má tvar paraboly a u turbulentního se podobá obdelníkovému tvaru, viz. (obr. 3.3). Ze závislosti tlakové ztráty Δp_z na rychlosti v při laminárním a turbulentním proudění plyne, že tlaková ztráta Δp_z pro turbulentní proudění roste s druhou mocninou rychlosti v .

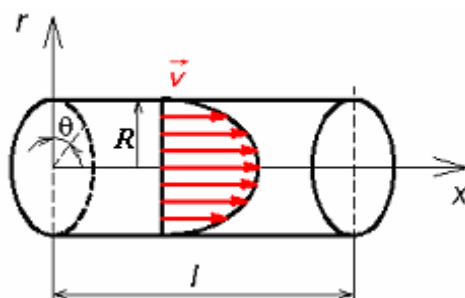


- tzv. rotační paraboloid - tzv. obdélníkový tvar Závislost $p_z = f(v)$

Obr 3.3 – Rychlostní charakteristika a při proudění skutečné kapaliny [5]

3.2. Laminární proudění tekutiny v potrubí kruhového průřezu

Laminární proudění v potrubí kruhového průřezu nastane při $Re \leq Re_k = 2320$, z toho plyne, že proudění nastává při nižších Reynoldsových číslech, kdy se proudění vyznačuje uspořádaným (vodorovným) pohybem tekutiny. Pro ustálené laminární proudění je charakteristické, že se tekutina pohybuje ve vodorovném směru, jednotlivé vrstvy se navzájem nemísí. Laminární proudění se vyskytuje v technické praxi tam, kde průtočné kanály jsou malé, viskozita kapaliny menší a také menší průtoková rychlost – např. těsnící mezery ložiska s hydrodynamickým mazacím filtrem. Na (obr 3.4) je znázorněn rychlostní profil v potrubí kruhového průřezu o délce l a poloměru R , při laminárním proudění.



Obr.3.4 - Rychlostní profil v potrubí, válcový souřadný systém [2]

R -poloměr potrubí [m], l -délka potrubí [m], \vec{v} -okamžitá rychlost [$m \cdot s^{-1}$]

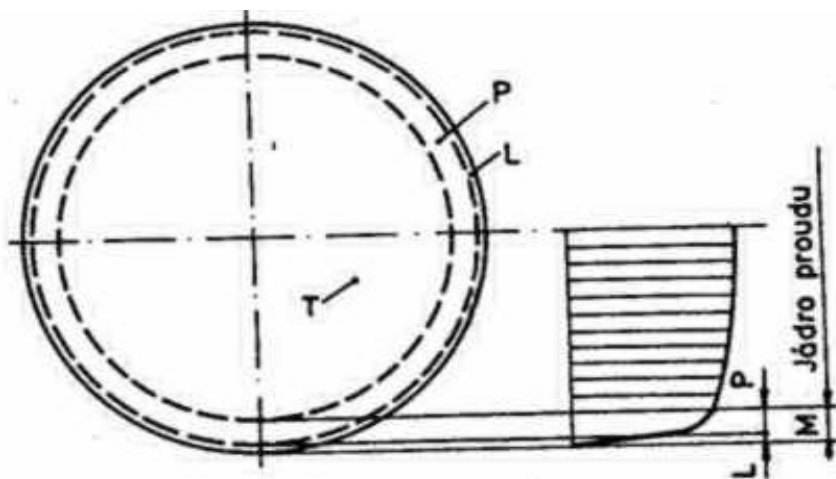
3.3. Turbulentní proudění tekutiny v potrubí kruhového průřezu

Turbulentní proudění v potrubí kruhového průřezu nastane při $Re > Re_k = 2320$, z tohoto důvodu částice kapaliny vykonávají neuspořádaný pohyb všemi možnými směry, jak ve vodorovném tak i ve svislém směru. Pokles tlaku při turbulentním proudění je mnohem větší než u laminárního proudění. Při laminárního proudění je odpor proti pohybu menší, z důvodu proudění kapaliny jen v jednom směru, tudíž klade menší odpor na stěny potrubí, ale při turbulentním proudění je tomu právě naopak. Prandtl a Kármán proto později rozdělili turbulentní proud v blízkosti stěny na tři oblasti, který je znázorněn na (obr. 3.5).

Turbulentní proud se skládá z :

- **vazké podvrstvy (L)**, která se vytvoří v těsné blízkosti hladké stěny, kde převažuje viskózní tečné napětí nad zdánlivým turbulentním napětím, neboť příčné složky flukтуаčních rychlostí jsou stěnou tlumeny. Tato vrstva je velmi tenká, několik desetin milimetru, ale má velký význam při přestupu tepla. Rychlostní profil je přímkový.
- **přechodové vrstvy (P)**, což je ta část proudu, kde obě tečná napětí způsobená viskozitou nebo turbulentním směřovacím pohybem jsou řádově stejně veliká a rychlost plynule přechází z přímkového na logaritmický zákon.
- **turbulentního jádra proudu (T)**, které se nachází v určité vzdálenosti od stěny, kde už je tečné napětí od viskozity tekutiny zanedbatelné ve srovnání se zdánlivým turbulentním napětím. V této oblasti platí logaritmický zákon.
- **turbulentní mezní vrstvy (M)**, která se skládá z laminární podvrstvy a přechodové vrstvy.

Popis jednotlivých vrstev turbulentního proudu je na (obr. 3.5).



Obr. 3.5 – Turbulentní proud v potrubí [5]

T - turbulentního jádro proudu, M - turbulentní mezní vrstva, L - vazká podvrstva,
P - přechodová vrstva

3.4. Stlačený vzduch

Stlačený vzduch, který získáváme z kompresoru, je nositelem tlakové energie. Toto medium je potřebné k provozu pneumatických mechanismů. Složení atmosférického vzduchu je následující : 78% dusíku, 21% kyslíku a 1% vzácných plynů, (vyjádřeno objemově). Atmosférický vzduch při teplotě 20°C obsahuje asi 16 až 20 g prachu na m³. Při výpočtech pneumatických mechanismů uvažujeme s čistým a suchým vzduchem. Základní fyzikální veličiny vzduchu jsou uvedeny v (tab.3.1).

Tab. 3.1 Základní fyzikální veličiny vzduchu [8]

Hustota při teplotě 20°C a tlaku 100 kPa	$\rho = 1,164(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
Měrná plynová konstanta	$r = 287,1(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
Univerzální plynová konstanta	$R = 8341(\text{J} \cdot \text{K}_{\text{mol}}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
Měrná tepelná kapacita při p=konst. při v=konst.	$c_p = 1,003 \cdot 10^3(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ $c_v = 0,716 \cdot 10^3(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
Rychlost zvuku při teplotě 20°C	$v = 344(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
Adiabatický exponent	$\chi = 1,4$
Poměr měrných tepelných kapacit	$c_p/c_v=1,4$
Dynamická viskozita při teplotě 20°C a tlaku 100 kPa	$\eta = 18,55 \cdot 10^{-6}(\text{Pa} \cdot \text{s})$
Kinematická viskozita při teplotě 20°C a tlaku 100 kPa	$\nu = 15,55 \cdot 10^{-6}(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$

Hustota vzduchu je dle (tab. 3.1) při teplotě 20°C a tlaku 100 kPa definována konstantní hodnotou. Při proměnných parametrech, je nutné definovat výpočet hustoty pomocí stavové rovnice. Tato rovnice je daná vztahem mezi stavovými veličinami (termodynamickou teplotou T , tlakem p , objemem V , látkovým množstvím n a hmotností plynu m).

Stavová rovnice je definovaná pomocí následujícího vztahu :

$$p \cdot V = m \cdot r \cdot T \quad /: m \quad (4.1)$$

$$\frac{p \cdot V}{m} = r \cdot T$$

$$\frac{p}{\rho} = r \cdot T$$

Popis proměnných

T - teplota [K], m - hmotnost plynu [kg], p - tlak [Pa], V - objem, ρ - hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];
 n - látkové množství [mol], r - měrná plynová konstanta [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], R - univerzální plynová konstanta [$\text{J} \cdot \text{K}_{\text{mol}}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

4. Měření průtoku tekutin

Patří mezi důležité oblasti měření neelektrických veličin v hydromechanice. Existuje velké množství principů, které jsou používány pro měření průtoku, i různé typy průtokoměrů. Pojem průtok se často používá pro označení rychlosti proudění. Měření průtoku lze uskutečnit jak u kapalin tak i plynů. Mezi základní metody patří měření objemového průtoku, hmotnostního průtoku, měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem a měření rychlosti proudění kapaliny.

4.1. Objemový průtok

Objemovým průtokem Q_v označujeme objem tekutiny, který proteče průřezem potrubí za jednotku času. Pro stanovení objemového průtoku využíváme měření pomocí rozdílů tlaků před a za primárním prvkem průtokoměru nebo také pomocí výpočtu z rychlosti proudění tekutiny v potrubí o daném průřezu. Předpokládáme ovšem, že tekutina zaplňuje celý průřez potrubí, což v mnoha případech nemusí vždy odpovídat realitě. Při měření průtoku kapalin je někdy potřeba provádět korekci objemového průtoku na změny teploty a tlaku. Objemový průtok vypočteme z následujícího vztahu :

$$Q_v = \frac{V}{t} = S \cdot v \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (4.2)$$

Popis proměnných :

V - objem tekutiny [m^3], t - čas [s], S - plocha [m^2], v - rychlost [$m \cdot s^{-1}$]

4.2. Hmotnostní průtok

Hmotnostní průtokem Q_m označujeme hmotnost tekutiny, která proteče potrubím kruhového průřezu za jednotku času. Vedle nepřímého měření hmotnostního průtoku přepočtem z objemového průtoku Q_v , také existuje relativně málo přímých metod pro měření hmotnostního průtoku. Pro přímé měření existují dvě základní metody - měření založené na Coriolisově principu a měření pomocí tepelného hmotnostního průtokoměru. Hmotnostní průtok je definován pomocí následujícího vztahu.

$$Q_m = \frac{m}{t} = \rho \cdot \frac{V}{t} Q_v \cdot \rho \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (4.3)$$

Popis proměnných :

V - objem tekutiny [m^3], t - čas [s], ρ - hustota [$kg \cdot m^{-3}$], m - hmotnost [kg], Q_v - objemový průtok [$kg \cdot s^{-1}$].

4.3. Základní metody měření průtoku tekutiny

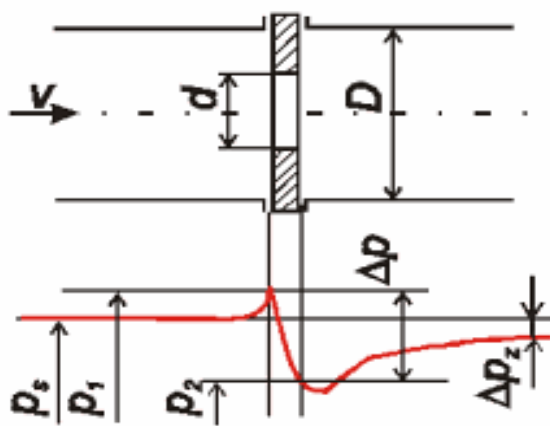
Mezi základní metody měření průtoku tekutiny patří:

- Měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem (clona, dýza, Venturiho trubice)
- Stanovení průtoku pomocí měření rychlosti
- Měření objemového průtoku
- Měření hmotnostního průtoku

Měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem

Většina škrtících orgánů je založena na principu měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem. Mezi nejpoužívanější škrtící orgán patří clona. Je to kroužek

s otvorem uprostřed, který je vždy menší jak průměr potrubí. Clona se umísťuje do potrubí, většinou je zhotovená z odpovídajícího nebo odolnějšího materiálu, který odolá proudícímu médiu. Medium, které proudí v potrubí by také nemělo měnit vlastnosti clony. Zde můžeme zařadit škrťací orgány pracující na podobném principu jako clona. Patří sem dýza, Venturiho trubice, atd. Průřez clonou je zobrazen na (obr. 4.1). Na obrázku je zobrazena charakteristika průběhu tlaku p_1 před a tlaku p_2 za škrťacím orgánem a trvalá tlaková ztráta Δp_z . Clona má otvor o průměru d , kterým protéká proudící medium. Před a za clonou jsou vyznačené odběry tlaku. Clona je umístěna v potrubí o průměru D .



Obr. 4.1 Tlakové poměry v okolí clony [4]

v - rychlost proudění, d - průměr otvoru clony, D - průměr potrubí, p_s - vstupní statický tlak,
 p_1 - snímaný tlak před clonou, p_2 - snímaný tlak za clonou, Δp - diferenční tlak ($p_1 - p_2$),
 Δp_z - trvalá tlaková ztráta

Mezi základní typy clon patří :

- Centrická clona - používá se pro homogenní látky.
- Excentrická clona - používá se pro nehomogenní látky.
- Segmentová - používá se pro potrubí, kde může být proudícím médiem kal.

Stanovení průtoku pomocí měření rychlosti

U tohoto principu měření se stanovuje objemový průtok ze vztahu (4.4):

$$Q_v = S \cdot v_s \quad (4.4)$$

Popis proměnných

v_s - střední rychlost [$m \cdot s^{-1}$], S - průřez potrubí [m^2]

Pro určování průtoku pomocí měření rychlosti se používají tyto průtokoměry (turbínkové průtokoměry, vírové průtokoměry, elektromagnetické průtokoměry a ultrazvukové průtokoměry).

Měření objemového průtoku

Slouží k měření objemu plynu nebo kapaliny v odměrných nádobách. Průtokoměry jsou založeny na cyklickém plnění a vyprazdňování odměrných prostor a měřítkem proteklého množství je počet měřicích cyklů. Do této skupiny patří pístový průtokoměr - tento přístroj patří k těm nejpřesnějším pro měření proteklého množství kapaliny. Měřenou kapalinou se střídavě naplňují a vyprazdňují odměrné prostory vymezené pístem a tělesem měřidla.

Měření hmotnostního průtoku

K přímému měření hmotnostního průtoku se využívá dvou základních průtokoměrů - Coriolisův průtokoměr a tepelný hmotnostní průtokoměr. Coriolisův průtokoměr viz. (obr. 4.2), využívá tzv. Coriolisovy síly, která vzniká ve vibrujících měřicích trubicích při průtoku kapaliny. Přístroj měří průtok, hustotu i teplotu a měření není závislé na vlastnostech měřené kapaliny, teplotě, tlaku, hustotě ani viskozitě. Je obousměrný a nemá žádné pohyblivé části. Velkou výhodou je velká přesnost měření až 0,1 %. Mezi nedostatky tohoto přístroje patří nutnost speciálního napájení a poměrně vysoká cena.



Obr.4.2 Coriolisův průtokoměr [4]

Tepelný hmotnostní průtokoměr - poskytuje údaj o okamžité hmotnosti protékajícího media. Přesnost přístroje při měření teploty media je $\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a přesnost při měření hmotnostního průtoku je $\pm 0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Tímto přístroji lze měřit velký rozsah teplot od 0 až do $+50 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Existují dva typy tohoto přístroje - termoanemometr a kalorimetrický průtokoměr. Na (obr. 4.3) je vrtulkový anemometr, který pomocí sondy měří hmotnostní průtok, teplotu a rychlost proudění protékajícího media.



Obr. 4.3 Vrtulkový anemometr [6]

5. Měření tlaku

Tlak vzduchu na povrchu zemském se nazývá atmosférický tlak. Je-li absolutní tlak vyšší než atmosférický, nazýváme uvedený rozdíl přetlakem, a je-li rozdíl nižší jedná se o podtlak. Absolutní tlaky nižší než tlak atmosférický se nazývají vakuum. V dnešní době se jako jednotka tlaku používá pascal [Pa], v technické praxi se setkáváme s jednotkou jako je bar [bar]. Mezi další jednotky, patří fyzikální atmosféra [atm] a také jednotka torr [Torr].

Pro přehlednost, uvedu převod na jednotky Pascal :

$$1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ torr} = 133,322 \text{ Pa}$$

Tlak je obecně definován vztahem :

$$p = \frac{F}{S} \quad [\text{Pa}] \quad (5.1)$$

Popis proměnných

F - síla [N], S - průřez potrubí [m²]

5.1. Rozdělení přístrojů k měření tlaku

Přístrojů k měření tlaku je velké množství a jejich rozdělení lze provést pomocí různých hledisek. Podle druhu měřeného tlaku lze přístroje rozdělit na :

- tlakoměry absolutního tlaku
- vakuometry (měřidlo absolutního tlaku menšího než atmosférický tlak)
- barometry (měřidlo atmosférického tlaku)
- manometry (tlakoměry pro měření přetlaku)
- diferenční tlakoměry (pro měření diferenčního tlaku, rozdílu dvou působících tlaků)

Podle výstupního signálu lze přístroje rozdělit do tří kategorií a to na :

- mechanické
- hydrostatické
- elektrické

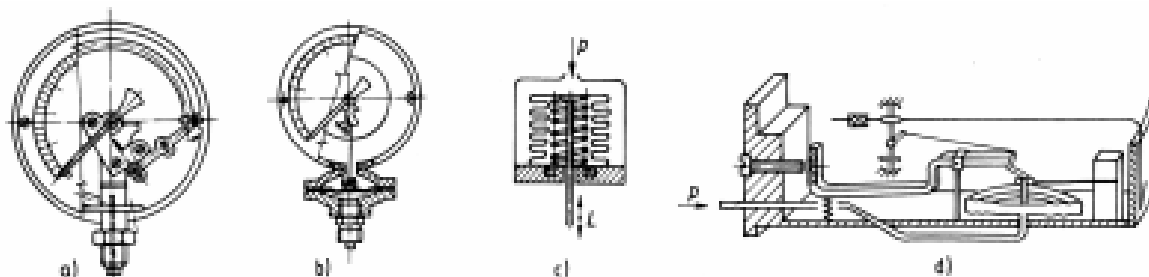
Podle funkčního principu lze přístroje rozdělit na :

- kapalinové
- pístové
- deformační
- elektrické

Kapalinové tlakoměry - jsou založeny na účinku hydrostatického tlaku, měření tlaku se převádí na měření výšky sloupce kapaliny. Jsou velmi přesné a používají se pro měření malých a středních tlaků. Jsou buď jedno nebo dvoukapalinové, dále je rozlišujeme podle uspořádání trubic na svislé nebo šikmé. Patří sem (U-trubicový, nádobkový tlakoměr, tlakoměr zvonový a prstencový).

Pístové tlakoměry se silovým účinkem - měření tlaku se převádí na měření síly, jejíž účinky jsou vyvažovány např. závažím či pružinou. Zde řadíme pístový tlakoměr, který je na (obr. 5.1) a zvonový tlakoměr.

Deformační tlakoměry – jsou přístroje, u kterých měřený tlak způsobuje pružnou deformaci tlakoměrného členu. Velikost deformace je úměrná hodnotě měřeného tlaku. Jsou to nejčastěji používané tlakoměry v průmyslu. Na (obr. 5.2) je několik typů tlakoměrů.



Obr. 5.2 Deformační tlakoměry [6]

a) trubicový b) membránový c) vlnovcový d) krabicový

Elektrické tlakoměry - využívají principu tlakové závislosti některých elektrických veličin. Jedná se o moderní a perspektivní snímače doplněné vesměs moderními elektronickými vyhodnocovacími obvody. Lze sem zařadit snímače tlaku s odporovými tenzometry, kapacitní snímače tlaku a piezoelektrické snímače tlaku.

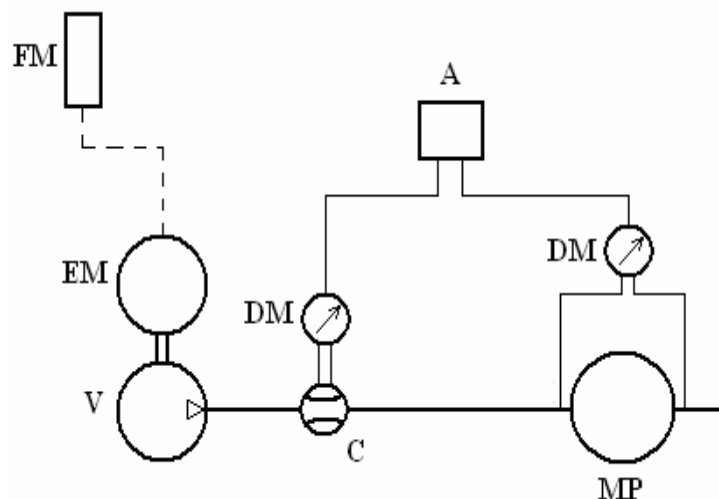
6. Návrh experimentální měřicí trati k měření místních tlakových ztrát

Experimentální měřicí trať, na které bude prováděno měření se nachází v laboratoři areálu VŠB, v místnosti E 306. Trať se skládá z prvků, které podrobněji popisují v kapitole 6.1, 6.2. Trať je sestavena, tak abych mohl všechna měření provést bez většího zásahu nebo změny na sestavené trati. Schéma experimentální měřicí trati a fyzické realizace je na (obr. 6.1), včetně popisu jednotlivých prvků obvodu.

6.1. Popis měřícího zařízení

Experimentální měřicí trať se skládá z ventilátoru **V**, ke kterému je připojen elektromotor **EM**, který je zdrojem energie ventilátoru. Pomocí frekvenčního měniče **FM** lze měnit otáčky. Na výstupu z ventilátoru je připojen přímý úsek plastového potrubí kruhového průřezu o ϕ d 46 mm a délce 3890 mm. Měřidlem průtoku je clona, která je umístěna ve vzdálenosti 500 mm od ventilátoru a za clonou je umístěn měřený prvek. Odběrné kroužky jsou vloženy před a za clonu a měřený prvek. Tyto kroužky mají po svém obvodu vytvořená tři symetrická odběrná místa, která slouží k odběru tlaku. Při

tomto měření jsou mezi tyto kroužky vloženy měřené prvky koleno 90°, koleno 45° a zúžení. U těchto prvků se měří tlaková difference pomocí diferenčního manometru **DM**, ke kterému jsou připojeny odběrné kroužky. Diferenční manometr **DM** má rozsah tlakové difference od 0 až do 2500 Pa a je připojen k zařízení pro zpracování naměřených dat ALMEMO 2290-3 A.

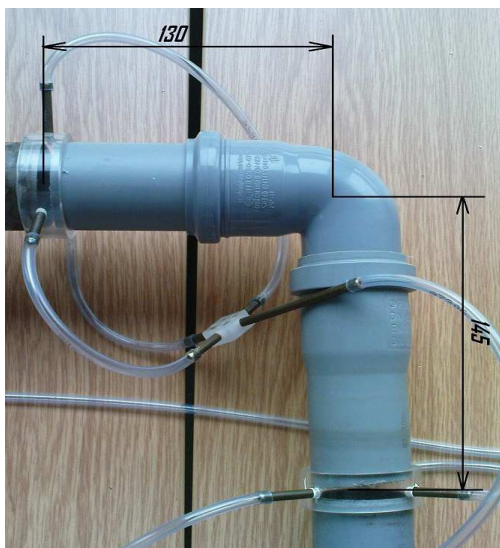


Obr. 6.1 Schéma experimentální měřicí tratě a fyzická realizace [3]

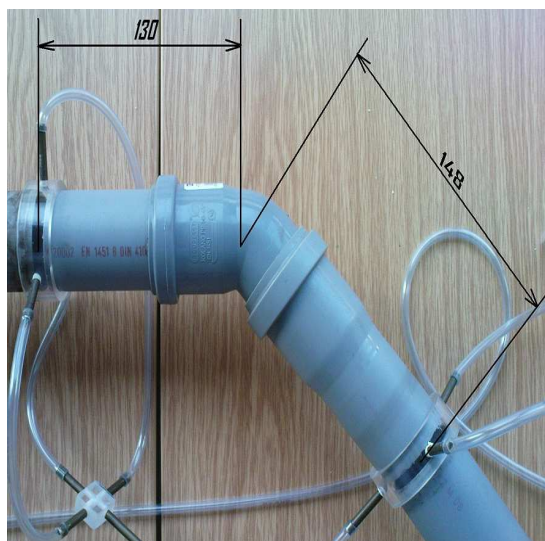
V-ventilátor, EM-elektromotor, FM-frekvenční měnič, DM-diferenční manometr,
A- zařízení pro zpracování dat, MP-měřený prvek, C-clona

Použité prvky při měření jsou : koleno 90°, koleno 45° a zúžení. Tyto prvky jsou zobrazeny na (Obr. 6.2, 6.3, 6.4). Na jednotlivých prvcích se měří tlaková ztráta Δp_z . Prvky jsou připojeny do potrubí o $\phi 46 \text{ mm}$, před a za měřeným prvkem jsou připojeny odběrné kroužky, které jsou připojeny k diferenčnímu manometru. Na obrázcích je naznačena poloha odběrných míst.

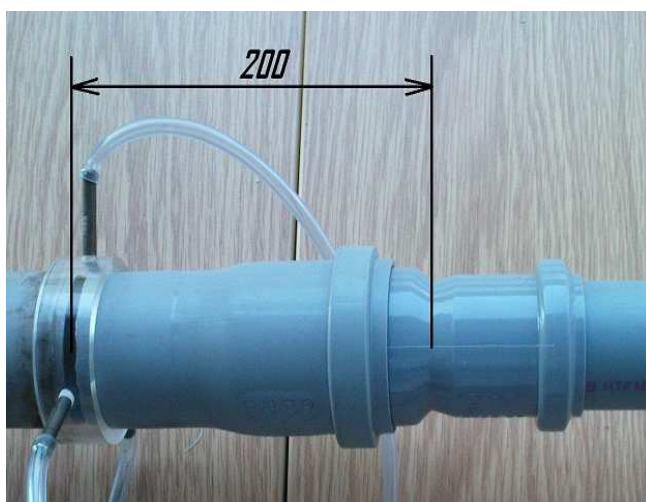
Prvky použité při měření :



Obr. 6.2 Koleno 90°



Obr. 6.3 Koleno 45°





Obr. 6.4 Zúžení

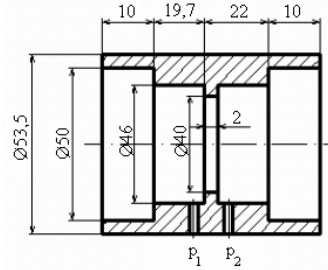


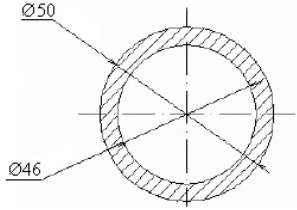

6.2. Specifikace prvků použitých při měření na experimentální měřící trati

Při specifikaci prvků vycházím z návodu pro měření třecích ztrát na vzduchové trati [3].

Trat' pro měření místních ztrát na vzduchové trati obsahuje:

1. elektromotor
2. ventilátor
3. frekvenční měnič
4. clona
5. snímače tlakové difference
6. vyhodnocovací zařízení
7. odběrné kroužky
8. plastové potrubí

Elektromotor + ventilátor (EM + V) Typ: HRD 1T/FU-105 Hz/0,75 kW Průtok: $11 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ Tlak: 4900 Pa Frekvence: 105 Hz Výkon motoru: 0,9 kW Otáčky: 6200 min^{-1} Výrobce: energoekonom spol. s.r.o.	 El. motor a ventilátor
Frekvenční měnič (FM) Typ: Combivert F5-B (Basic) Napájení: 3 x 400 V Výkon: 0,75 kW Výrobce: Karl E. Brinkmann GmbH Max. výstupní frekvence : 1600 Hz Max. proud : 5,6 A	 Frekvenční měnič

<p>Clona (C)</p> <p>Materiál: Silon</p> <p>Výrobce: VŠB</p>	 <p>Clona</p>
<p>Snímač tlakové difference (DM)</p> <p>Typ: FD8612DPS</p> <p>Měřicí rozsah: 0-2500 Pa</p> <p>Výstup: analogový (0 – 10 V)</p> <p>Napájecí napětí: 6 V</p> <p>Přesnost: $\pm 1 \%$</p> <p>Přetíženost: pětinásobná</p> <p>Výrobce: AHLBORN GmbH</p>	 <p>Snímač tlakové difference</p>
<p>Vyhodnocovací zařízení (A)</p> <p>Typ: ALMENO 2290-3</p> <p>Napájení: 9 V</p> <p>Vstup: 2 x analogový</p> <p>Výstup: 2 x analogový</p> <p>Výrobce: AHLBORN GmbH</p>	 <p>Vyhodnocovací zařízení</p>
<p>Potrubí</p> <p>Materiál: Plast</p>	 <p>Potrubí</p>
<p>Odběrný kroužek (K)</p> <p>Materiál: Silon</p>	 <p>Odběrný kroužek</p>

Obr. 6.5 Specifikace prvků použitých při měření [3]

6.3. Postup měření :

Úkolem tohoto měření je stanovit součinitel místních ztrát na předem určených prvcích v potrubí kruhového průřezu, pro různé průtoky vzduchu. Pro měření byly použity tyto prvky - koleno 90°, koleno 45° a zúžení.

1.Sestavím experimentální měřicí trať, a zkontroluji jestli jsou všechny prvky správně zapojeny tzn.(funkčnost a těsnost prvků a hadiček).

2.Připojím snímače difference tlaku ke cloně a měřenému prvku, resp. k odběrným kroužkům, které jsou umístěny před a za měřeným prvkem.

3.Snímače tlakové difference připojím na vyhodnocovací zařízení(ALMENO).

4.Zapnu elektromotor a frekvenční měnič na kterém nastavím požadovanou frekvenci, která odpovídá určitým otáčkám. Přepočet frekvence na otáčky : $n = 60 \cdot f$

5.Frekvenci zvyšuji o 5 Hz, až na maximální hodnotu 105 Hz

6.Při každé nastavené frekvenci vyhodnotím hodnoty tlakového spádu na cloně(Δp_c) a prvku(Δp_z).

7.Naměřené hodnoty tlakového spádu na cloně Δp_c a vloženém prvku Δp_z uvedu do tabulky.

8.Naměřené a vypočtené hodnoty základních fyzikálních veličin zpracuji v podobě tabulek a grafů.

9.Zhodnotím měření.

7. Vyhodnocení naměřených hodnot pro měření na koleni 90°

7.1. Postup výpočtu

1. Naměřené hodnoty tlakového spádu na cloně Δp_c a vloženém prvku Δp_z použijí pro následující výpočty. Naměřené hodnoty jsou obsaženy viz. (tab.7.1).

2. Střední rychlost v_s určím ze vztahu pro cejchovací křivku clony ($v_s = 0,9045 \cdot x^{0,5321}$). Za neznámou x ve vzorci dosadím naměřenou hodnotu tlakového spádu na cloně Δp_c a vyhodnocení střední rychlost v_s .

3. Objemový průtok Q_v určím ze vztahu

$$Q_v = S \cdot v_s \Rightarrow \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v_s$$

4. Reynoldsovo číslo určím ze vztahu :

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\nu_{vzduchu}}$$

Kinematická viskozita vzduchu, při teplotě 20°C a tlaku 100 kPa : $\nu_{vzduchu} = 0,00001555 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, průměr potrubí $d = 46 \text{ mm}$

5. Součinitel místních ztrát se vypočte ze vztahu

$$\Delta p_z = \zeta_m \cdot \frac{v_s^2}{2} \cdot \rho_{vzduchu} \Rightarrow \zeta_m = \frac{2 \cdot \Delta p_z}{v_s^2 \cdot \rho_{vzduchu}}$$

Hustota vzduchu, při teplotě 20°C a tlaku 100 kPa : $\rho_{vzduchu} = 1,164 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

6. Vzorec pro výpočet otáček

$$n = 60 \cdot f \text{ min}^{-1}$$

7.2. Příklad výpočtu pro koleno 90° :

(hodnoty jsou brány pro č.m. 1.)

$$v_s = 0,905 \cdot \Delta p_c^{0,5321} = 0,905 \cdot 66,4^{0,5321} = 8,433 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Q_v = S \cdot v_s \Rightarrow \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v_s = \frac{\pi \cdot 0,046^2}{4} \cdot 8,433 = 0,014 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Re} = \frac{v_s \cdot d}{\nu_{\text{vzduchu}}} = \frac{12,774 \cdot 0,046}{0,00001555} = 24946,616$$

$$\xi_m = \frac{2 \cdot \Delta p_z}{v_s^2 \cdot \rho_{\text{vzduchu}}} = \frac{2 \cdot 40,9}{8,433^2 \cdot 1,164} = 0,988$$

$$n = 60 \cdot f = 60 \cdot 25 = 1500 \text{ min}^{-1}$$

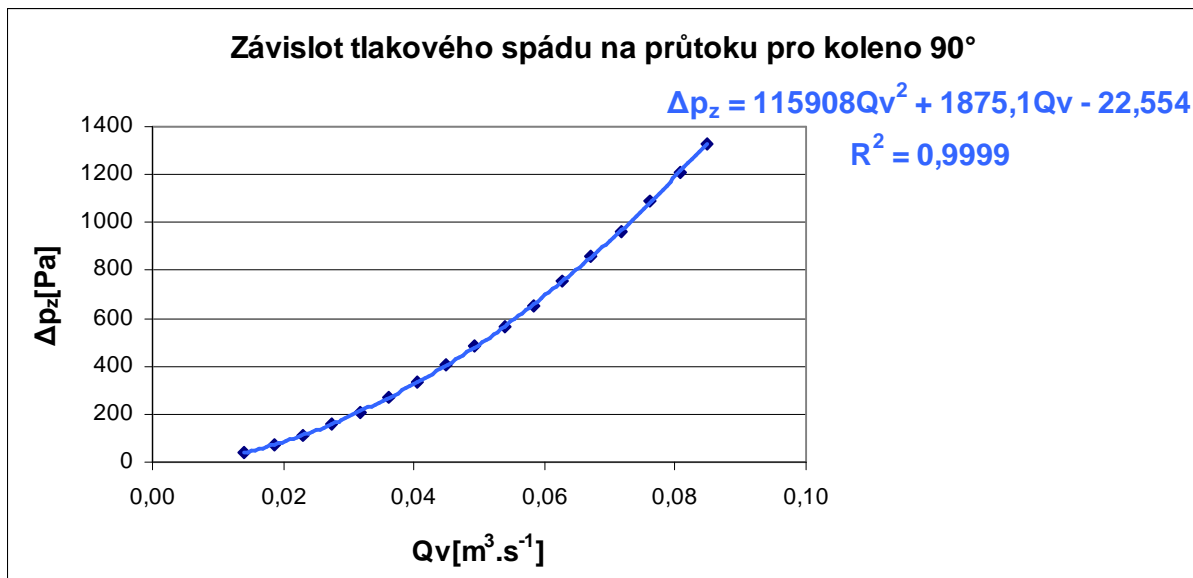
7.3. Naměřené a vypočtené hodnoty pro koleno 90°

Uvedené hodnoty jsou z měření pro koleno 90°. Hodnoty byly zpracovány v programu Microsoft Excel. První tři sloupce udávají naměřené hodnoty a dalších pět sloupců udává hodnoty určené pomocí výpočtu, viz. (kap. 7.2).

č.m.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty				
	f	Δp_c	Δp_z	v_s	Q_v	Re	ξ_m	n
	[Hz]	[Pa]	[Pa]	[m.s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]	[1]	[1]	[min ⁻¹]
1	25	66,4	40,9	8,433	0,014	24946,616	0,988	1500
2	30	112,5	72,6	11,164	0,019	33025,870	1,001	1800
3	35	167,2	111,7	13,785	0,023	40777,447	1,010	2100
4	40	232,5	157,6	16,428	0,027	48597,023	1,003	2400
5	45	308,9	209,2	19,109	0,032	56528,586	0,984	2700
6	50	396,1	267,4	21,812	0,036	64524,993	0,966	3000
7	55	487,6	331,5	24,363	0,040	72070,030	0,960	3300
8	60	591,7	404,7	27,005	0,045	79886,106	0,954	3600
9	65	705,2	481,7	29,648	0,049	87704,724	0,942	3900
10	70	834,4	565,9	32,424	0,054	95917,814	0,925	4200
11	75	963,2	654,4	34,998	0,058	103531,271	0,918	4500
12	80	1109	753,9	37,724	0,063	111594,833	0,910	4800
13	85	1261	856,1	40,386	0,067	119468,440	0,902	5100
14	90	1426	961,6	43,124	0,072	127568,371	0,888	5400
15	95	1593	1090,5	45,744	0,076	135320,637	0,895	5700
16	100	1780	1208,5	48,524	0,081	143543,818	0,882	6000
17	105	1962	1326,8	51,100	0,085	151163,108	0,873	6300

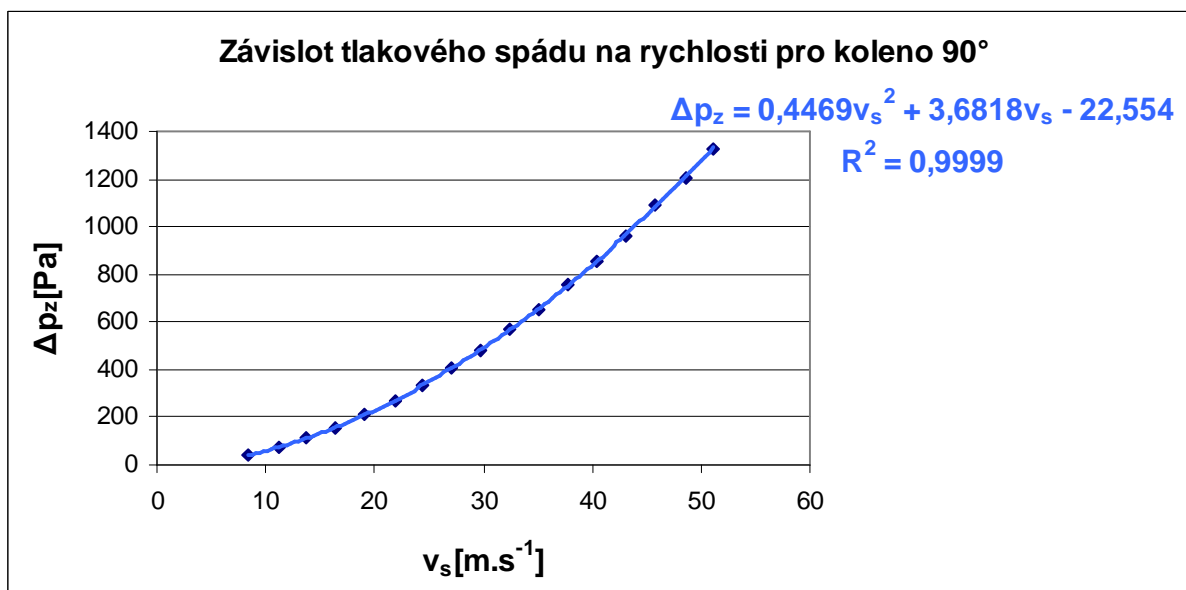
Tab. 7.1 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro koleno 90°

7.4. Grafické závislosti z naměřených a vypočtených hodnot pro koleno 90°



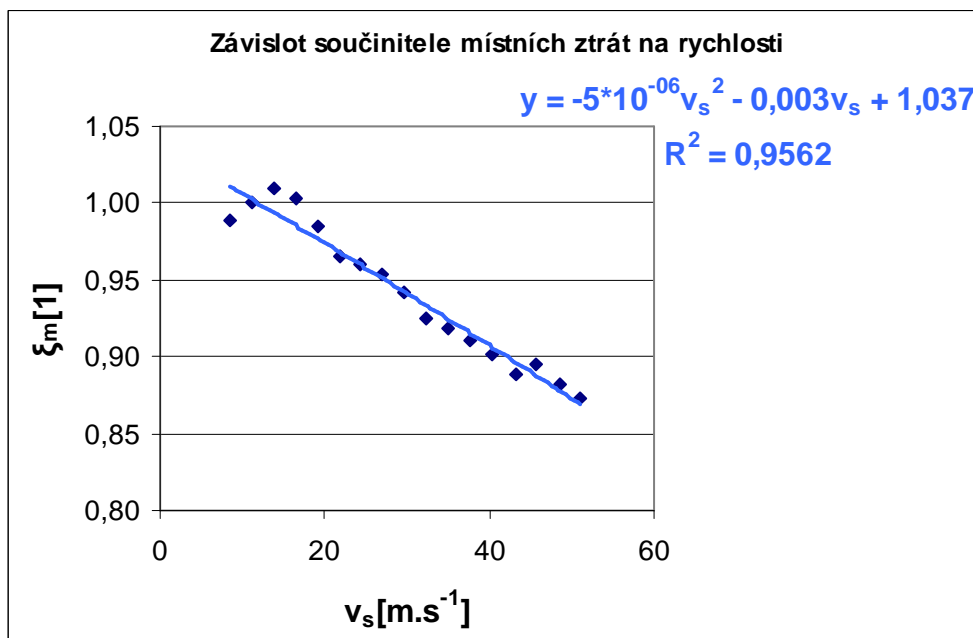
Obr.7.1 Grafická závislost tlakového spádu na průtoku pro koleno 90°

Na (obr. 7.1) je zobrazena závislost tlakového spádu pro vložený prvek (koleno 90°) na průtoku. Z průběhu je patrné, že s rostoucím průtokem Q_v také roste tlakový spád Δp_z na vloženém prvku. Tlakový spád Δp_z nabývá hodnot od 40,9 do 1326,8 Pa.



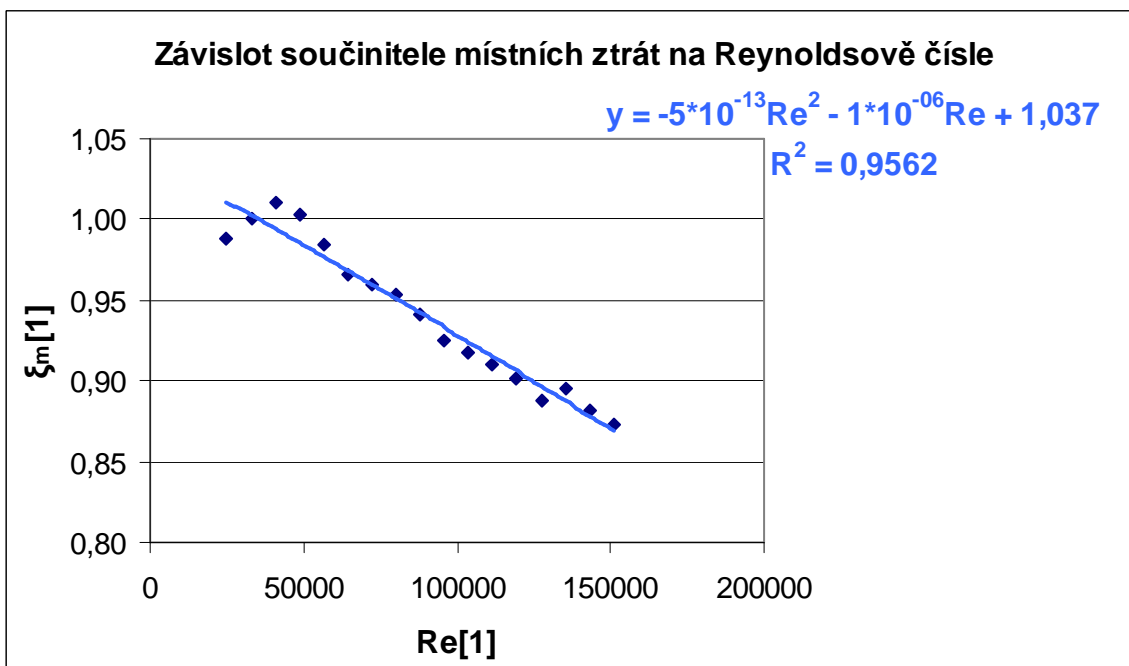
Obr.7.2 Grafická závislost tlakového spádu na střední rychlosti kolena 90°

Na (obr. 7.2) je zobrazena závislost tlakového spádu pro vložený prvek (koleno 90°) na rychlosti. Z průběhu je patrné, že s rostoucím střední rychlostí v_s také roste tlakový spád Δp_z na vloženém prvku. Střední rychlostí v_s nabývá hodnot od 8,433 do 51,1 $m \cdot s^{-1}$.



Obr.7.3 Grafická závislost součinitele místních ztrát na rychlosti pro koleno 90°

Na (obr. 7.3) je zobrazena závislost součinitele místních ztrát na rychlosti pro (koleno 90°). Z průběhu je patrné, že na počátku jsou místní ztráty ξ_m v závislosti na střední rychlosti v_s největší a se zvyšující se střední rychlostí v_s místní ztráty ξ_m na vloženém prvku klesají.



Obr.7.4 Grafická závislost součinitele místních ztrát na Reynoldsově čísle pro koleno 90°

Na (obr. 7.4) je zobrazena závislost součinitele místních ztrát na Reynoldsově čísle pro (koleno 90°). Z průběhu je patrné, že na počátku jsou místní ztráty ξ_m v závislosti na Reynoldsově čísle Re největší a se zvětšujícím se Reynoldsovým číslem Re místní ztráty na vloženém prvku ξ_m klesají.

8. Závěr

Téma této bakalářské práce se věnuje problematice měření součinitele místních ztrát použitých prvků na vzduchové trati. Měření se provádělo na sestavené vzduchové trati, která se nachází v laboratořích na E306. Při měření jsem byl pod odborným dohledem vedoucího bakalářské práce a byl jsem obeznámen s bezpečnostními předpisy všech přístrojů potřebných k tomuto měření.

V teoretické části jsem se snažil přiblížit definici tlakových ztrát v potrubí, ale zejména ztrátám místním, které jsou v této práci podstatnější. V druhé kapitole jsem se zabýval tématikou proudění skutečných kapalin. Zde je důležitým pojmem Reynoldsovo číslo, které určuje jestli jde o laminární nebo turbulentní proudění. Čtvrtá a pátá kapitola se zaměřuje na problematiku měření průtoku a tlaků, které patří mezi základní úlohy v oboru hydrauliky. Jsou zde zahrnuty metody měření objemového, hmotnostního průtoku a typy přístrojů k měření tlaku.

Praktická část měření je realizována v laboratoři E306. Zde jsem sestavil experimentální měřicí trať viz.(obr. 6.1), která je tvořena prvky, viz. (obr. 6.5). Trať je sestavena z plastových trubek, které jsou lehce rozebíratelné. Měření je realizováno s cílem určit součinitel místních ztrát na vložených prvcích, viz. (obr. 6.2, 6.3, 6.4). Ke stanovení součinitele místních ztrát jsou použité naměřené hodnoty tlakové ztráty Δp_z prvku a tlakové ztráty Δp_c clony. Z porovnání naměřených hodnot tlaková ztráty Δp_z u kolena 90° a kolena 45° plyne, že u kolena 90° jsou tlakové ztráty mnohem větší než u kolena 45° , viz (tab.10.1, 10.2). Při maximálním průtoku vzduchu $Q_v=0,085 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ je tlaková ztráta pro koleno 90° ($\Delta p_z=1327\text{Pa}$) a pro koleno 45° ($\Delta p_z =505\text{Pa}$). Naměřené a vypočtené hodnoty na vložených prvcích, viz. (kap. 10.1) byly převedeny do podoby grafických závislostí viz. (kap. 10.2). Grafy zobrazují závislosti tlakového spádu Δp_z na objemovém průtoku Q_v a střední rychlosti v_s pro zvolené prvky. Následně jsou vyhodnoceny grafické závislosti součinitele místních ztrát ξ_m na střední rychlosti v_s a Reynoldsově čísla Re . Z grafických závislostí tlakového spádu Δp_z na objemovém průtoku Q_v je zřejmý obdobný trend. Nejvyšší tlaková ztráta Δp_z je dosažena u zúžení, pak následuje koleno 90° a koleno 45° pro stejné parametry měření.

9. Seznam použité literatury

- [1] Drábková, S., Kozubková, M.: Cvičení z mechaniky tekutin, VŠB-TU Ostrava, 2002.
- [2] Drábková, S. a kol.: Mechanika tekutin, VŠB-TU Ostrava, 2007.
- [3] KOZUBKOVÁ, M.; KOLEKTIV. *Mechanika tekutin návody pro laboratorní měření*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 2007
- [4] <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=4624>
- [5] http://kolasinovydeti.euweb.cz/dwl/sem_halag.pdf
- [6] [http://www.testo.cz/online/abaxx-?\\$part=PORTAL.CZE.ProductCategoryDesk&\\$event=show-from-menu&categoryid=4741306](http://www.testo.cz/online/abaxx-?$part=PORTAL.CZE.ProductCategoryDesk&$event=show-from-menu&categoryid=4741306)
- [7] Janalík, J.: Vybrané kapitoly z mechaniky tekutin, VŠB-TU Ostrava, 2008.
- [8] Kopáček, J., Žáček, M.: Pneumatické zařízení strojů. Skripta. VŠB-TU Ostrava, 2003. 94 s. ISBN 80-248-0442-5.

10. Přílohy

10.1. Naměřené a vypočtené hodnoty vložených prvků

č.m.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty				
	f	Δp_c	Δp_z	v_s	Q_v	Re	ξ_m	n
	[Hz]	[Pa]	[Pa]	[m.s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]	[1]	[1]	[min ⁻¹]
1	25	66,4	40,9	8,433	0,014	24946,616	0,988	1500
2	30	112,5	72,6	11,164	0,019	33025,870	1,001	1800
3	35	167,2	111,7	13,785	0,023	40777,447	1,010	2100
4	40	232,5	157,6	16,428	0,027	48597,023	1,003	2400
5	45	308,9	209,2	19,109	0,032	56528,586	0,984	2700
6	50	396,1	267,4	21,812	0,036	64524,993	0,966	3000
7	55	487,6	331,5	24,363	0,040	72070,030	0,960	3300
8	60	591,7	404,7	27,005	0,045	79886,106	0,954	3600
9	65	705,2	481,7	29,648	0,049	87704,724	0,942	3900
10	70	834,4	565,9	32,424	0,054	95917,814	0,925	4200
11	75	963,2	654,4	34,998	0,058	103531,271	0,918	4500
12	80	1109	753,9	37,724	0,063	111594,833	0,910	4800
13	85	1261	856,1	40,386	0,067	119468,440	0,902	5100
14	90	1426	961,6	43,124	0,072	127568,371	0,888	5400
15	95	1593	1090,5	45,744	0,076	135320,637	0,895	5700
16	100	1780	1208,5	48,524	0,081	143543,818	0,882	6000
17	105	1962	1326,8	51,100	0,085	151163,108	0,873	6300

Tab.10.1 Naměřené a vypočtené hodnoty pro koleno 90°

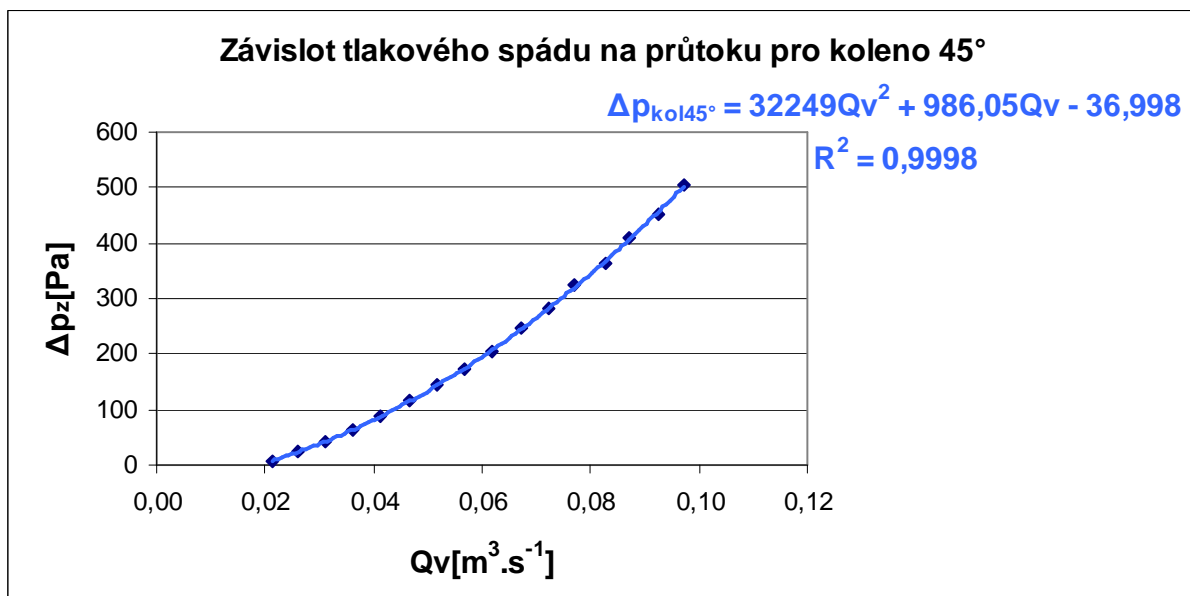
č.m.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty				
	f	Δp_c	Δp_z	v_s	Q_v	Re	ξ_m	n
	[Hz]	[Pa]	[Pa]	[m.s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]	[1]	[1]	[min ⁻¹]
1	30	144,9	8,5	12,774	0,021	37786,833	0,090	1800
2	35	214,9	24,2	15,754	0,026	46603,551	0,168	2100
3	40	299,2	42,7	18,787	0,031	55577,009	0,208	2400
4	45	397,2	64,4	21,844	0,036	64620,279	0,232	2700
5	50	505,5	87,9	24,835	0,041	73465,940	0,245	3000
6	55	636,6	115,2	28,077	0,047	83056,466	0,251	3300
7	60	771,6	144,9	31,102	0,052	92006,267	0,257	3600
8	65	921,1	173,7	34,176	0,057	101098,252	0,256	3900
9	70	1085	205,9	37,293	0,062	110319,443	0,254	4200
10	75	1262	245,9	40,413	0,067	119549,100	0,259	4500
11	80	1453	282,1	43,550	0,072	128829,084	0,256	4800
12	85	1629	324,2	46,291	0,077	136939,138	0,260	5100
13	90	1863	363,5	49,712	0,083	147058,950	0,253	5400
14	95	2062	407,7	52,471	0,087	155219,611	0,254	5700
15	100	2306	451,4	55,689	0,093	164737,853	0,250	6000
16	105	2529	505,1	58,494	0,097	173035,792	0,254	6300

Tab.10.2 Naměřené a vypočtené hodnoty pro koleno 45°

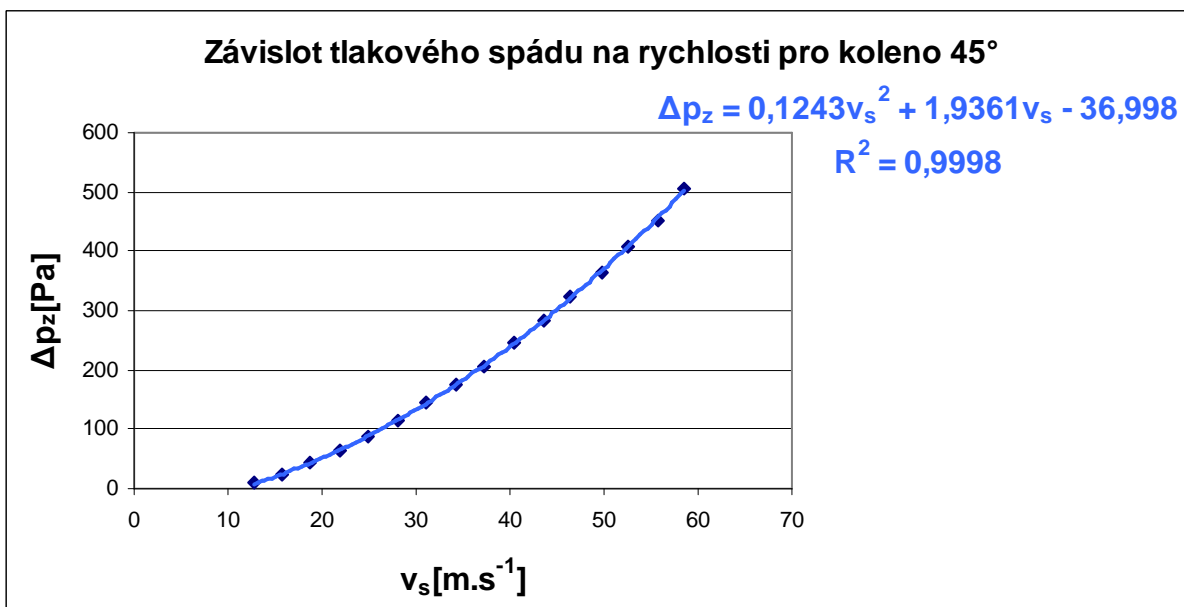
č.m.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty				
	f	Δp_c	Δp_z	v_s	Q_v	Re	ξ_m	n
	[Hz]	[Pa]	[Pa]	[m.s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]	[1]	[1]	[min ⁻¹]
1	30	110,1	109,5	11,037	0,018	32649,087	1,545	1800
2	35	165	162,2	13,688	0,023	40491,067	1,488	2100
3	40	229,6	224,1	16,319	0,027	48273,540	1,446	2400
4	45	303,5	297,2	18,931	0,031	56000,596	1,425	2700
5	50	385,6	376,4	21,503	0,036	63609,140	1,399	3000
6	55	476,9	466,4	24,077	0,040	71224,136	1,382	3300
7	60	590,9	574,5	26,986	0,045	79828,617	1,356	3600
8	65	695,4	679,5	29,428	0,049	87054,071	1,348	3900
9	70	817,4	795,4	32,071	0,053	94872,966	1,329	4200
10	75	950,4	908,6	34,750	0,058	102796,900	1,293	4500
11	80	1078,8	1042,3	37,174	0,062	109967,381	1,296	4800
12	85	1229,2	1187,5	39,847	0,066	117875,669	1,285	5100
13	90	1396,6	1345,2	42,648	0,071	126162,080	1,271	5400
14	95	1575,6	1503,5	45,475	0,076	134523,145	1,249	5700
15	100	1736,1	1696,1	47,884	0,080	141649,070	1,271	6000
16	105	1915,3	1865,8	50,453	0,084	149249,957	1,259	6300

Tab.10.3 Naměřené a vypočtené hodnoty pro zúžení

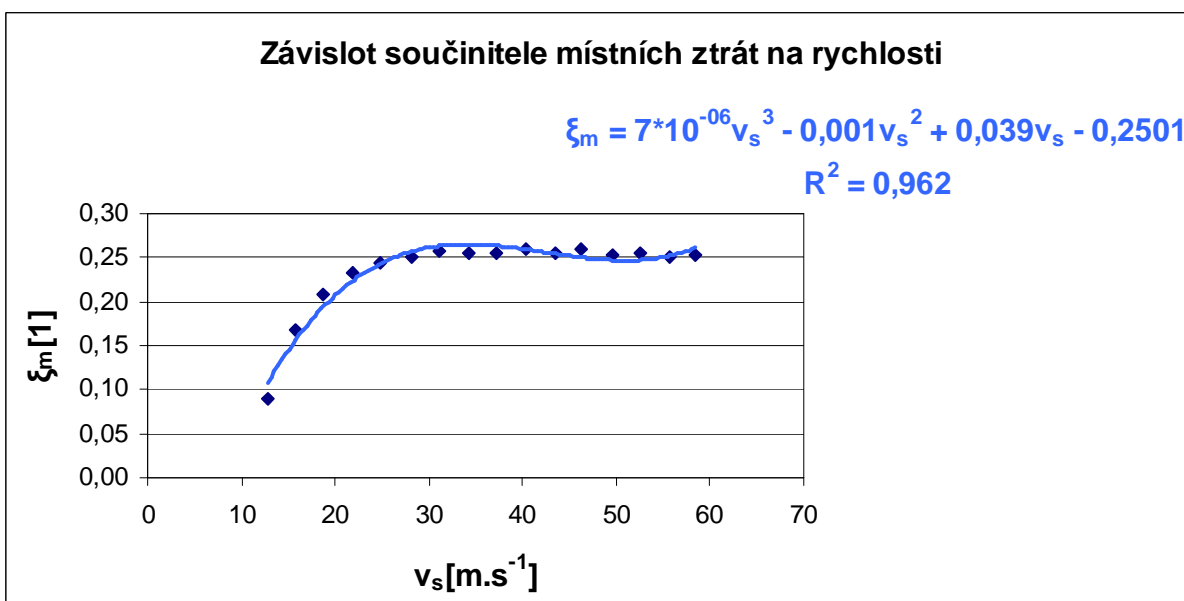
10.2. Grafické závislosti vložených prvků



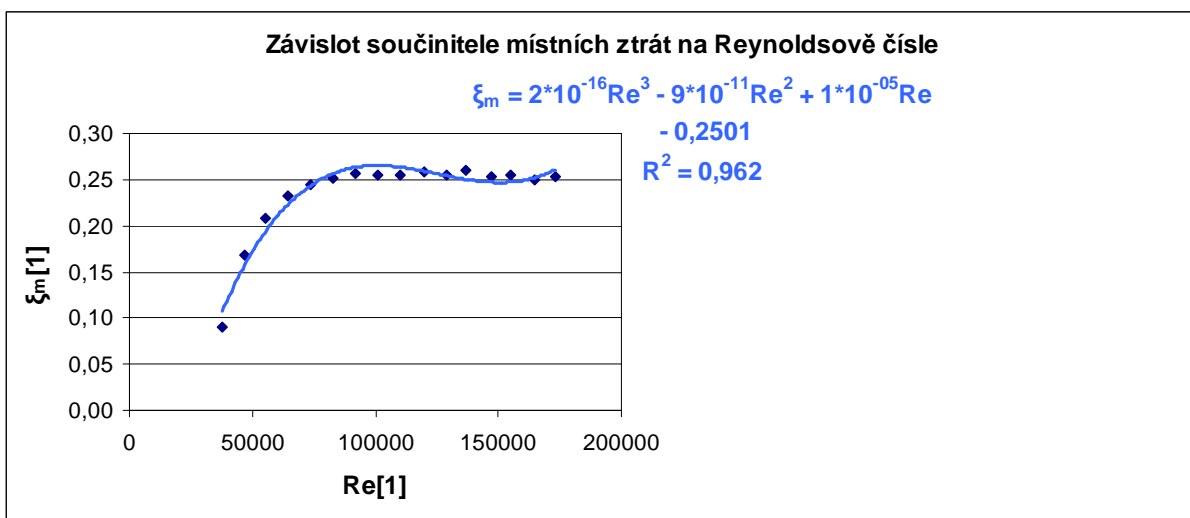
Obr.10.1 Grafická závislost tlakového spádu na průtoku pro koleno 45°



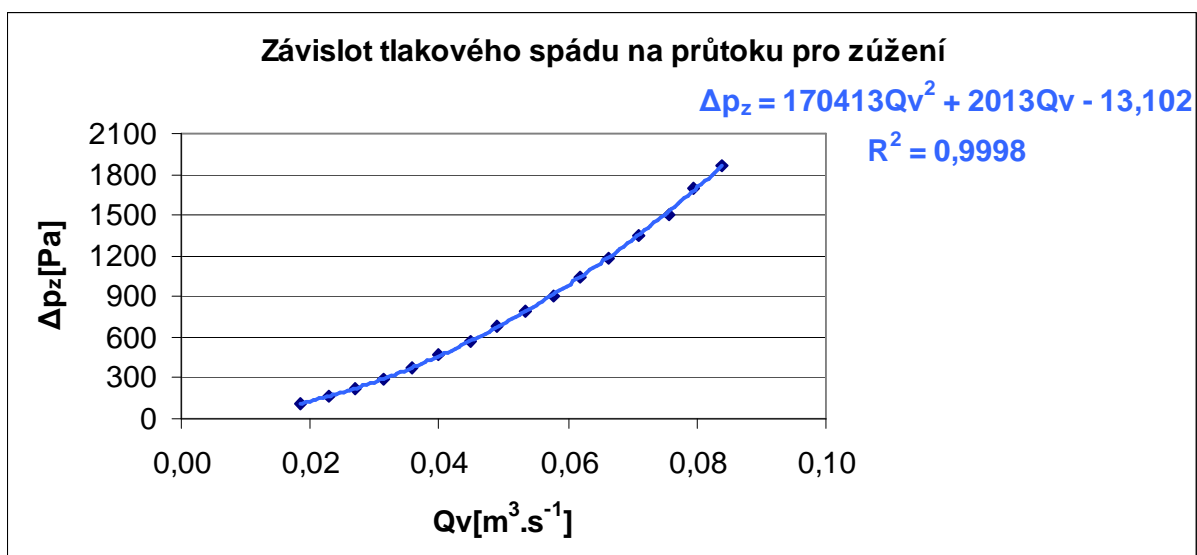
Obr.10.2 Grafická závislost tlakového spádu na rychlosti pro koleno 45°



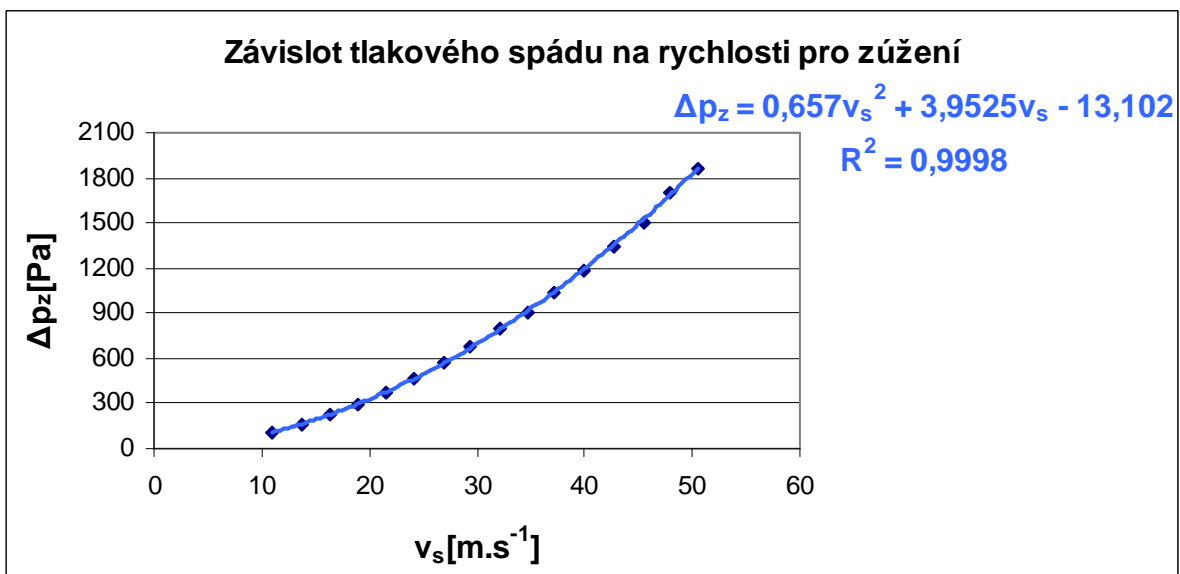
Obr.10.3 Grafická závislost součinitele místních ztrát na rychlosti pro koleno 45°



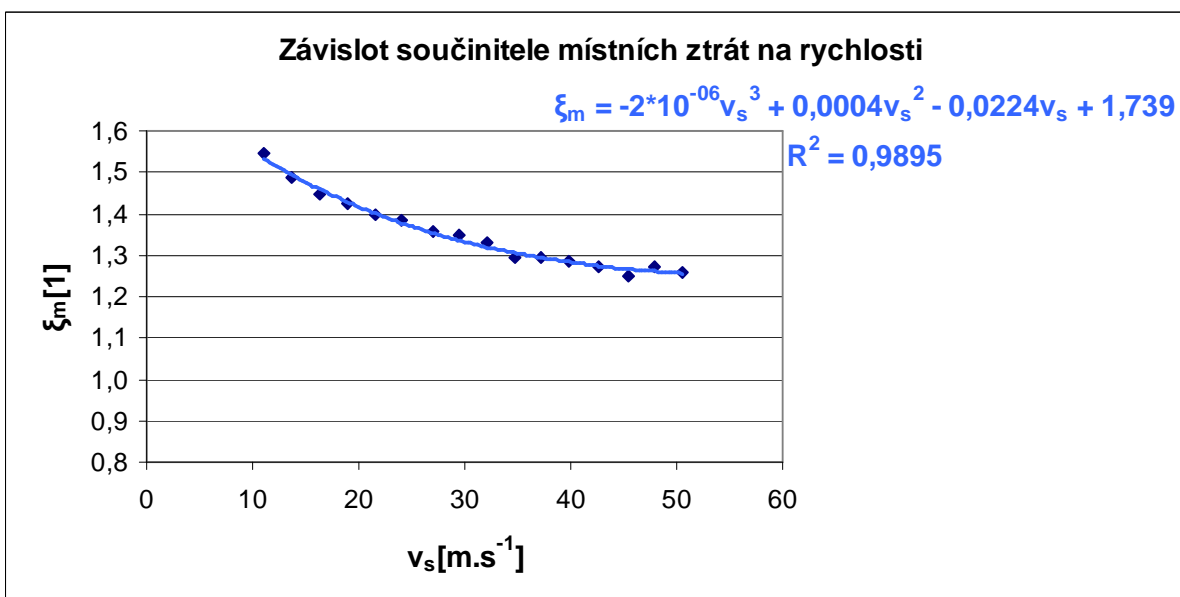
Obr.10.4 Grafická závislost součinitele místních ztrát na Reynoldsově čísle pro koleno 45°



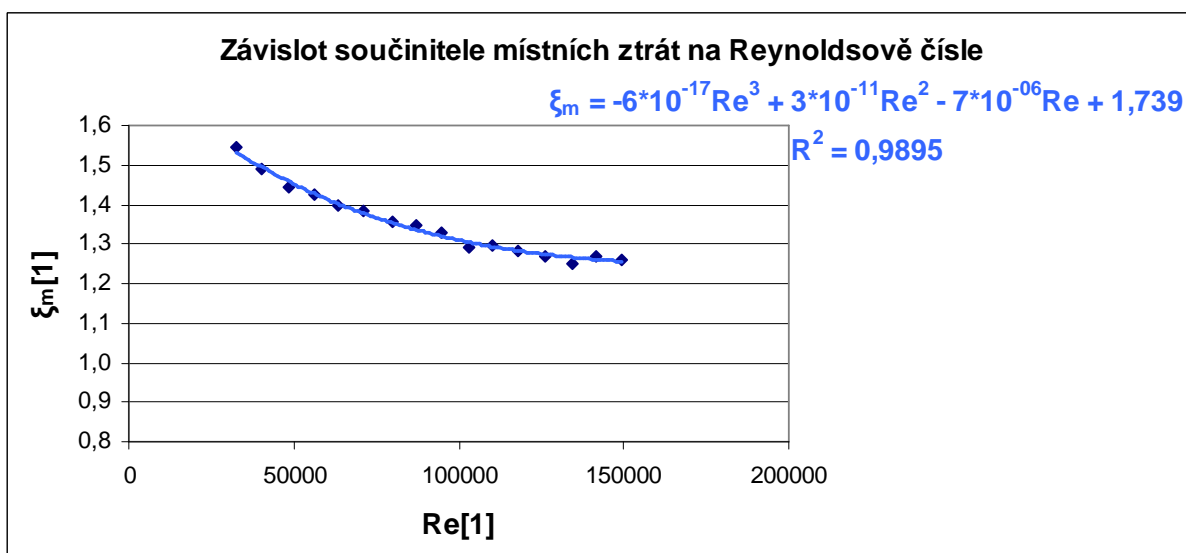
Obr.10.5 Grafická závislost tlakového spádu na průtoku pro zúžení



Obr.10.6 Grafická závislost tlakového spádu na rychlosti pro zúžení



Obr.10.7 Grafická závislost součinitele místních ztrát na rychlosti pro zúžení



Obr.10.8 Grafická závislost součinitele místních ztrát na Reynoldsově čísle pro zúžení